



УДК 621.515

**3D-СКАНИРОВАНИЕ И ДОРАБОТКА
ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО
НАГНЕТАТЕЛЯ RF-2BB-36****3D-SCANNING AND DEVELOPMENT OF
CENTRIFUGAL COMPRESSOR RF-2BB-36R**

Крутиков Михаил Викторович, бакалавр каф. «Турбины и двигатели», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: michail.krutikov2809@mail.ru. Тел.: +7(343)375-48-51

Ледков Денис Евгеньевич, магистрант каф. «Турбины и Двигатели», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: ledkov.d@gmail.com, Тел.: +7(343)375-48-51

Блинов Виталий Леонидович, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры "Турбины и двигатели" Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: vithomukyn@mail.ru, Тел.: +7(343)375-48-51

Mikhail V. Krutikov, student, Department «Turbines and engines», Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: michail.krutikov2809@mail.ru. Ph.: +7(343)375-48-51

Denis E. Ledkov, Master student, Department «Turbines and engines», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: ledkov.d@gmail.com, Ph.: +7(343)375-48-51

Vitaly L. Blinov, Candidate of technical sciences, senior lecturer of the department, Department «Turbines and engines», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: vithomukyn@mail.ru, Ph.: +7(343)375-48-51

Аннотация: В статье описан процесс 3D-сканирования геометрии центробежного нагнетателя природного газа с целью построения его трехмерной модели, адаптированной для использования в программных комплексах вычислительной газовой динамики для численного анализа течения в проточной части.

Abstract: The article describes the process of 3D scanning of the geometry of a centrifugal compressor is described in order to construct its three-dimensional model adapted for use in software computational gas dynamics for numerical analysis of flow in a flowing part.

Ключевые слова: центробежный нагнетатель; 3D-сканирование; проектирование.

Key words: centrifugal compressor; 3D-scanning; engineering.

ВВЕДЕНИЕ

Центробежные нагнетатели (ЦБН), также называемые радиальными компрессорами, являются ключевым оборудованием в различных областях промышленности. Эти машины используются в большом количестве различных применений, где требуется процесс сжатия: химическая и нефтегазовая промышленность, металлургия, горнодобывающая промышленность, энергетика и т.д. Особо широкое обращение ЦБН нашлось на газоперекачивающих станциях отечественной газотранспортной системы (ГТС). Большинство нагнетателей, использующихся на ГТС, спроектировано и введено в эксплуатацию до 90-х годов предыдущего столетия. В связи с постепенным изменением направлений и объемов транспорта газа, а также развитием новых

технологий проектирования и изготовления оборудования данного класса, возникает необходимость в модернизации проточных частей ЦБН или адаптации существующих конструкций к новым режимам работы за счет незначительных изменений их конструкции. При этом существует проблема отсутствия информации о некоторых геометрических параметрах эксплуатируемых ЦБН. Одним из способов решения которой является применение метода трехмерного сканирования. 3D-сканирование является систематическим процессом для установления координат точек, принадлежащих поверхностям сложнопрофильных физических объектов с целью дальнейшего создания пространственных математических моделей данных объектов. Полученные модели модифицируются с помощью CAD-систем. Устройства, с помощью которых

осуществляется сканирование объектов, называют 3D-сканерами [1]. 3D сканер является высокоточным измерительным прибором способным на основе анализа исследуемого объекта создать его цифровую трехмерную модель (Рис. 1).

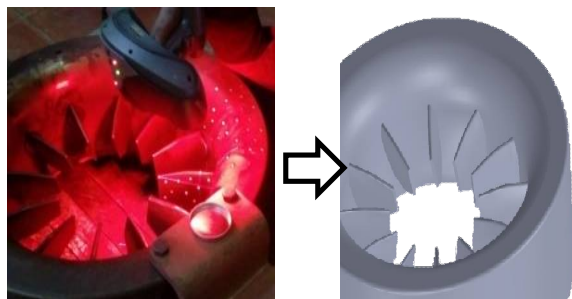


Рис. 1. Процесс (слева) и результат (справа) сканирования входного направляющего аппарата

ТРЕХМЕРНОЕ СКАНИРОВАНИЕ

Использование данного способа находит широкое применение прежде всего в инженерии. Полученную с помощью сканера 3D-модель можно использовать для анализа и расчетов в CAD/CAE-системах. Существует множество моделей 3D сканеров, использующих различные принципы работы, каждый из которых обладает своими свойствами и возможностями, позволяющие оцифровывать те или иные объекты [2].

Лазерный 3D-сканер основан на принципе фиксации отраженных лазерных лучей с помощью камеры. Для позиционирования сканера используются светоотражающие метки, наносимые на деталь. Также сканер имеет функции настройки силы света и частоты импульсов лазера для адаптации к определенным условиям освещения помещения и сканируемой поверхности.

В методах классического проектирования деталь строится относительно базовых элементов, таких как базовая плоскость и/или базовая ось для деталей вращения. Принципиальным отличием реверс-инжиниринга от классического проектирования является отсутствие данных базовых элементов. На основе полученной полигональной модели необходимо создать оси вращения и секущие плоскости для дальнейшего построения эскизов. Данные операции будут являться ключевыми факторами точности построения конечной детали. Все дальнейшие инструменты не отличаются от стандартных, такие как бобышка, вытянуть и т.д. На рисунке 2 продемонстрирован пример построения оси вращения. Предполагается, что плоскость на рисунке 2а, построенная через определение нескольких точек перпендикулярна оси вращения.

Далее строится окружность, полученная с помощью данной секущей плоскости (Рис. 2б). На рисунке 2в изображен итоговый вектор, проходящий через центр окружности и перпендикулярный первоначальной плоскости.

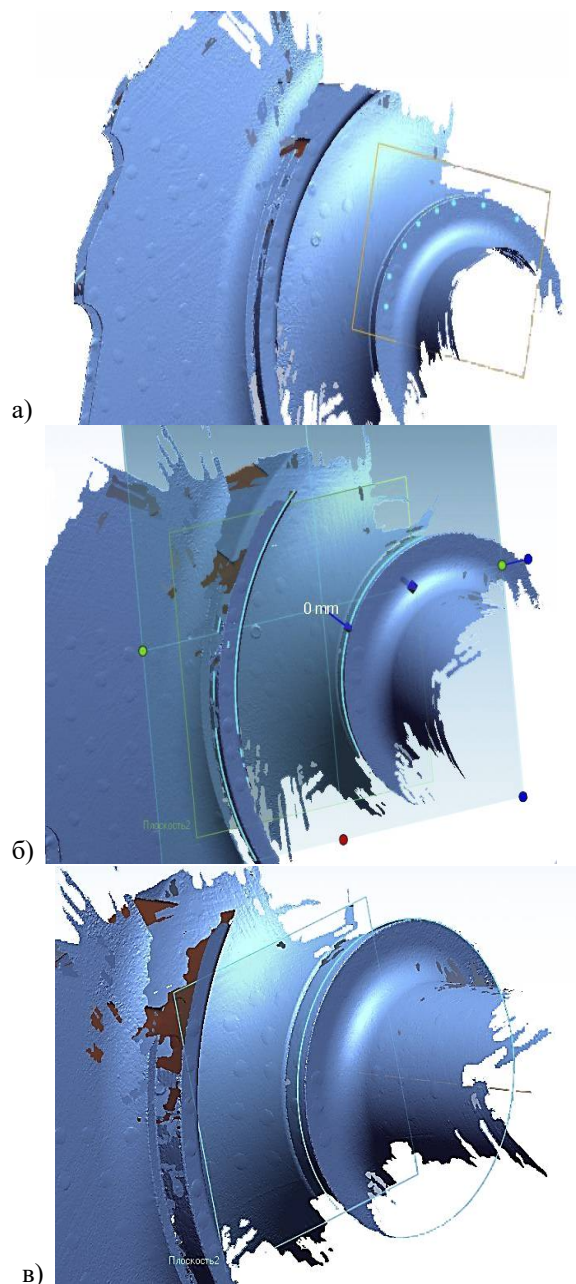


Рис. 2. Пример построения оси вращения

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта настоящего исследования выбран двухступенчатый центробежный нагнетатель с регулируемым входным направляющим аппаратом (ВНА) типа RF-2BB-36 «Крезо-Луар», эксплуатируемый на объектах отечественной ГТС (Рис. 3). Проводимая работа направлена на получение геометрических характеристик, необходимых для численного моделирования течения в проточной части ЦБН.

Для получения необходимой информации произведено 3D-сканирование элементов ЦБН на объекте эксплуатации (рисунки 1 и 2).

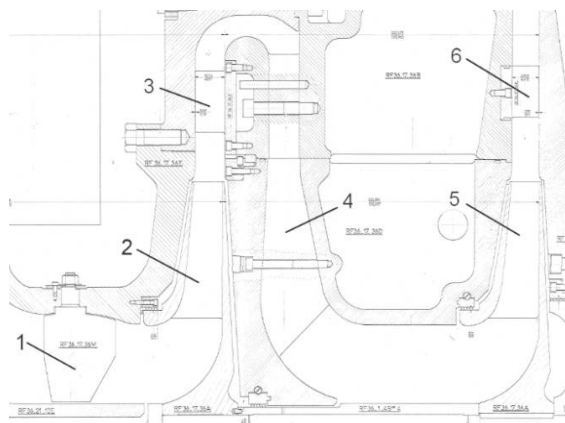


Рис. 3. Продольный разрез нагнетателя фирмы «Крезо Луар» типа RF-2BB-36:

1-входной направляющий аппарат (ВНА); 2-рабочее колесо (РК) 1-й ступени; 3-лопаточный диффузор 1-й ступени; 4-лопаточный обратный направляющий аппарат (ОНА); 5-РК 2-й ступени; 6-лопаточный диффузор 1-й ступени

ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящее время все чаще используются метод численного моделирования физических процессов в различных узлах турбомашин, в частности в проточной части ЦБН, реализуемый за счет различных специализированных программных комплексов, которые способствуют значительной экономии времени и средств в сравнении с натурными испытаниями. Данный метод является важной частью любого современного процесса проектирования и разработки каждого изделия. Это позволяет избежать проведение многочисленных дорогостоящих натурных экспериментов. Данный факт является наиболее важным т.к. измерения параметров при натурных испытаниях представляют собой сложнейшую задачу, порой полностью неосуществимую. Речь идет о параметрах, меняющихся с высокой скоростью. К ним можно отнести замеры параметров вращающихся элементов машины, стабилизации системы во время экспериментов и т.д. У данного метода существуют и недостатки. К таковым можно отнести некорректное «нефизичное» представление параметров – особенно это характерно для переходных режимов и течений. Данное условие требует тщательной верификации расчетной модели на основании данных экспериментов [3]

С применением 3D-сканирования осуществлен процесс перевода физической формы натурных деталей проточной части ЦБН в цифровую форму, что позволило получить геометрические характеристики следующих узлов: ВНА, (РК) 1-й

ступени, Диффузор 1-й ступени, ОНА, РК 2-й ступени, Диффузор 2-й ступени, Втулка, Крышка (Рис. 3 и 4). Разрез сборочной трехмерной модели представлен на рисунке 5.

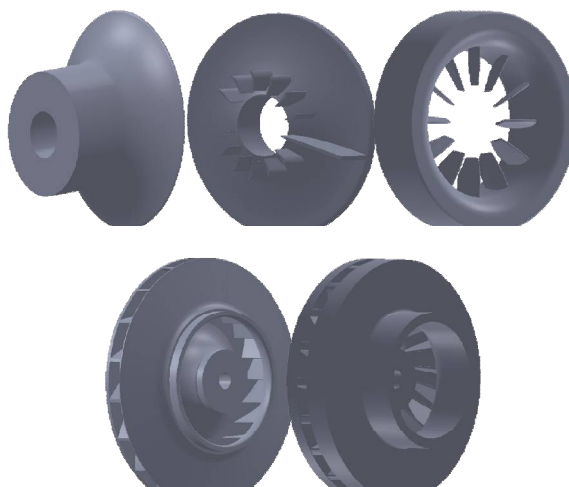


Рис. 4. 3D модели (слева-направо): втулки, крышки, ВНА, РК и ОНА

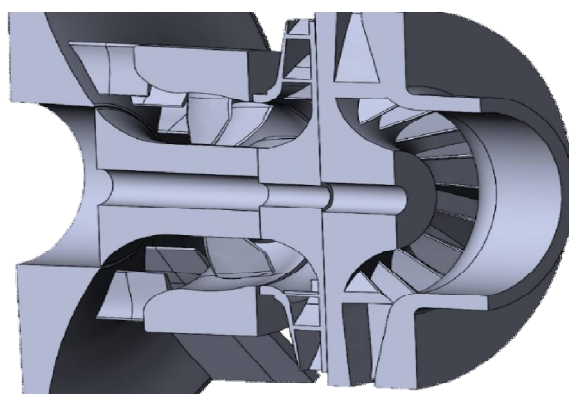


Рис. 5. Разрез сборочной 3D модели

В связи с ограничением доступа к некоторым труднодоступным местам внутренних деталей проточной части, возникали трудности при получении геометрических параметров во время сканирования данных проблемных элементов. С помощью программы твердотельного моделирования, придерживаясь опыту конструирования различных ЦБН [4, 5], осуществлена доработка эскизов проточной части RF-2BB-36 по полученным данным сканирования. В частности, были доработаны лопатки ОНА, контур обвода ОНА, поворотное колено между диффузором 1-й ступени и ОНА и переход между РК 2-й ступени и ОНА. Для входной кромки лопатки ОНА был выбран радиус равный 1,5 от радиуса выходной кромки ($R_{вх}=1,5R_{вых}$). Максимальный диаметр вписанной окружности ($S_{тах}$) сделан на высоте $\approx 72\%$ от высоты профиля лопатки. Поворотное колено и переход между ОНА и рабочим колесом второй ступени строились таким образом, чтобы его форма не искажала геометрию проточной части

нагнетателя, т.е. соответствовала спецификации контура обвода RF-2BB-36. Полученное меридиональное сечение необходимое для дальнейшего моделирования проточной части показано на рисунке 6.

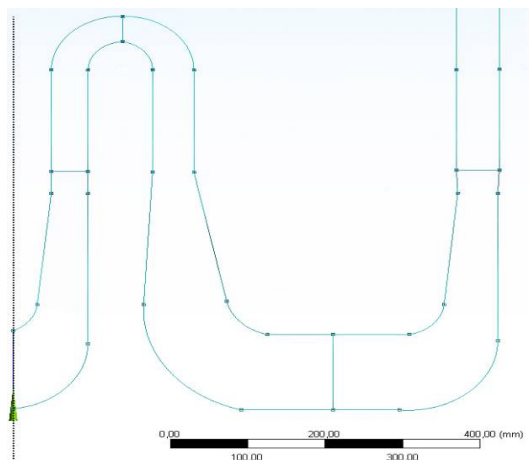


Рис. 6. Меридиональное сечение центробежного нагнетателя

ДАЛЬНЕЙШИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРАВЛЕНИЕ

Проведение численного эксперимента на основе построенной проточной части будет направлено на ее верификацию с дальнейшим изменением параметров течения в связи с наличием регулируемого ВНА у объекта исследования. Использование регулируемого ВНА позволяет закручивать поток по направлению вращения или против него, тем самым изменяя основные параметры нагнетателя, такие как напор, расход и степень сжатия. При закрутке по вращению уменьшается угол атаки на входе в лопатки рабочего колеса, напор и расход падают, а при закрутке против вращения, напротив, возрастают. Закрутка потока в основном сказывается на рабочем колесе, а на работе выходного устройства отражается мало. Однако закрутка против вращения из-за увеличения угла атаки и приближения срыва возможна в меньших пределах, чем по вращению. Она целесообразна при необходимости увеличения загрузки ГПА, если давления газа ниже расчетного, при каких-либо ограничениях по частоте вращения, а также в холодное время года при наличии запаса мощности на ГТУ [5]. Вышеуказанные методы позволят повысить эффективность работы RF-2BB-36, тем самым смещая характеристику нагнетателя в те области, которые необходимы в зависимости от требуемого режима работы. Однако особенностью конструкции ЦБН является то, что регулирование положения лопаток ВНА возможно осуществить только вручную на остановленном агрегате, т.е. невозможно использование онлайн регулирования в процессе эксплуатации. Угол установки лопаток в ВНА

имеет определенное положение, заданное заводом-изготовителем. В технической документации к данному нагнетателю, указанное положение никак не обосновано и рекомендаций к его регулированию отсутствуют. В результате наблюдаемого в настоящее время изменения режима работы ГТС в части объема транспортируемого газа, возникает необходимость анализа влияния изменения угла поворота ВНА на параметры ЦБН. За счет данного способа регулирования, согласно теории, возможно осуществление такого режима работы, который будет соответствовать необходимым параметрам работы ГТС. Планируется использование численного эксперимента с новым углом установки ВНА с применением разработанной модели ЦБН. В частности, будет рассматриваться введение отрицательной закрутки потока на малые значения, что позволит получить большие значения расхода и сместить характеристики в сторону большего напора и, соответственно, степени сжатия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данного исследования, путем 3D-сканирования, получены геометрические характеристики ЦБН. В дальнейшем произведена доработка созданной геометрии труднодоступных и проблемных участков проточной части. В итоге построено меридиональное сечение ЦБН, на основании которого будет производиться численное моделирование течения. Следующим этапом исследования является проведение численного эксперимента для оптимизации работы газоперекачивающего агрегата с ЦБН RF-2BB-36 за счет использования ВНА компрессора с целью согласования оптимальных параметров работы нагнетателя с изменившимися режимами работы ГТС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 3D-сканирование в интересах 3D-моделирования [Электронный ресурс] / URL: <http://www.comprice.ru/articles/detail.php?ID=40134>. (дата обращения: 19.04.2018)
2. Ледков Д.Е., Седунин В.А. 3D-сканирование // труды первой научно-технической конференции молодых ученых УрФУ. 2016. 4с.
3. Седунин В.А., Блинов В.Л., Бегетнев П.С., Дяттерева Е.Ю., Машечкин Н.В., Помелов Д.Н. Моделирование физических процессов в турбомашинах: Учебно-методическое пособие. Екатеринбург: УрФУ, 2016. 127 с.
4. Ден Г.Н. Проектирование проточной части центробежных компрессоров: Машиностроение: Ленингр. отд-ние, 1980. - 232 с.
5. Ревзин Б.С. Особенности конструкции одно- и двухступенчатых нагнетателей природного газа: Учебное пособие. Екатеринбург: 2000. - 102 с.